

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-324518

(43)Date of publication of application : 24.11.2000

(51)Int.Cl.

H04N 17/00
H01L 27/14
H01L 29/00
H04N 5/335

BEST AVAILABLE COPY

(21)Application number : 11-132861

(71)Applicant : NIKON CORP

(22)Date of filing : 13.05.1999

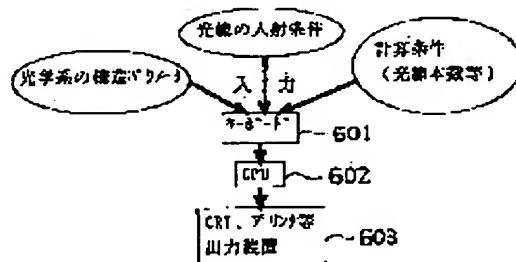
(72)Inventor : OKOCHI NAOKI

(54) CONDENSING SIMULATOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To obtain a condensing simulator with high precision by calculating the light receiving amount of a photo-diode in each pixel position on an image pickup surface.

SOLUTION: This condensing simulator is provided with a device 601 for inputting the geometrical and optical structure parameter of one pixel in an imaging device with a micro-lens, the incident condition of a condensed light beam to the device, which is decided by a camera lens system and a calculating condition such as the number of incident light beams or the number of incident points on one pixel, CPU 602 for calculating light beam tracking and a condensing rate and an output device 603 for outputting calculation results. The light receiving amount of the photo-diode in each pixel position is calculated based on the calculation result of each calculating means for calculating the optical design value of the micro-lens, the structure of the lens, data concerning the structure of a solid-state imaging device at the lower side of the lens, data inputted by each input means for inputting the position of the photo-diode, the incident angle and the refractive angle of the light on each boundary surface, the permeable rate of the light and a reflectance and for calculating reliance on the incident angle concerning the optical axis of an incident light strength.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

09.09.2005

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2000-324518

(P2000-324518A)

(43)公開日 平成12年11月24日 (2000. 11. 24)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード(参考)
H 0 4 N 17/00		H 0 4 N 17/00	K 4 M 1 1 8
H 0 1 L 27/14		H 0 1 L 29/00	5 C 0 2 4
29/00		H 0 4 N 5/335	V 5 C 0 6 1
H 0 4 N 5/335		H 0 1 L 27/14	Z

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 15 頁)

(21)出願番号 特願平11-132861

(22)出願日 平成11年 5 月13日 (1999. 5. 13)

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内 3 丁目 2 番 3 号

(72)発明者 大河内 直紀

東京都千代田区丸の内 3 丁目 2 番 3 号 株
式会社ニコン内

(74)代理人 100092897

弁理士 大西 正悟

Fターム(参考) 4M118 AA10 AB01 BA10 CA02 FA06

GB11 GD04

5C024 AA01 CA31 EA04

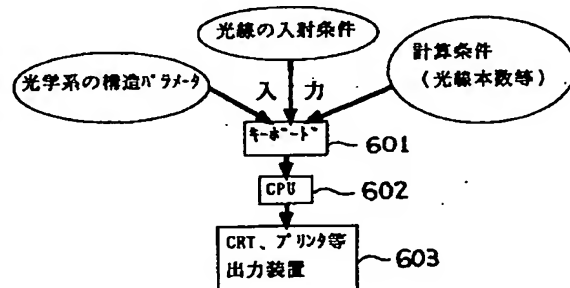
5C061 BB06 CC01 CC09

(54)【発明の名称】 集光シミュレータ

(57)【要約】

【課題】 カメラレンズ系による集光光をマイクロレンズを設けた固体撮像素子に入射させるときの正確な集光シミュレーションを行う。

【解決手段】 カメラレンズ系の光学設計値データを入力する第1入力手段と、マイクロレンズの構造データを入力する第2入力手段と、固体撮像素子の構造データを入力する第3入力手段と、固体撮像素子のフォトダイオードの位置を入力する第4入力手段と、固体撮像素子の各界面での光の入射角、屈折角、光の透過率、反射率を計算する第1計算手段と、カメラレンズ系の口径食を考慮し、入射光強度の光軸に対する入射角依存性を計算する第2計算手段と、上記入力手段による入力データと上記計算手段の計算結果とに基づいて、フォトダイオードの受光量を計算する第3計算手段とを備えて集光シミュレータが構成される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 カメラレンズ系により集光された光を画素毎にマイクロレンズを設けた固体撮像素子に入射させるときの集光シミュレーションを行う集光シミュレータであって、

前記カメラレンズ系の光学設計値に関するデータを入力する第1入力手段と、

前記マイクロレンズの構造に関するデータを入力する第2入力手段と、

前記マイクロレンズの下側における前記固体撮像素子を構成するフォトダイオードを含む部材の構造に関するデータを入力する第3入力手段と、

前記固体撮像素子における撮像面の画素を構成する前記フォトダイオードの位置を入力する第4入力手段と、

前記マイクロレンズ、前記フォトダイオードおよび前記部材の各界面での光の入射角および屈折角、光の透過率および反射率を計算する第1計算手段と、

前記カメラレンズ系の口径食を考慮し、入射光強度の光軸に対する入射角依存性を計算する第2計算手段と、

前記第1～第4入力手段により入力されたデータと前記第1および第2計算手段の計算結果とに基づいて、前記撮像面の各画素位置における前記フォトダイオードの受光量を計算する第3計算手段とを備えたことを特徴とする集光シミュレータ。

【請求項2】 前記固体撮像素子が前記フォトダイオードの受光面の周りを遮光する遮光膜を有しており、前記遮光膜における光反射を計算する第4計算手段を備え、前記第3計算手段は、前記第4計算手段の計算結果も加えて前記フォトダイオードの受光量の計算を行うことを特徴とする請求項1に記載の集光シミュレータ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は固体撮像素子を用いたカメラ装置に関し、特に、撮影中に撮像画面上の各画素の受光部に効率よく集光するためのマイクロレンズを各画素に設けて構成される固体撮像素子を用いたカメラ装置において、固体撮像素子への集光をシミュレーションして、マイクロレンズを設計するための集光シミュレータに関する。

【0002】

【従来の技術】 固体撮像素子は、近年においては多画素化が進み、画素サイズも小さくなってきている。CCD (Charge-Coupled Device) 等では電荷転送部、増幅用トランジスタ等の占める領域、すなわち、光電変換部以外の領域が構造的に存在するため、多画素化が進むに依りて撮像画面全体に占める受光面の開口率が下がる傾向にある。このようなことから従来から、受光面直上にマイクロレンズを形成して入射光を受光面に集光させ、実効開口率を高める工夫が知られている。このような構成において、最適なマイクロレンズ構造を求めるために、従

来からいくつかの集光シミュレーションが試みられている（例えば、特許第2574524号公報参照）。

【0003】 このようなマイクロレンズ付き固体撮像素子における集光シミュレーションの一例を、図13を参照して説明する。このシミュレーションにおいては、トーリック面を有したドーム型のマイクロレンズ101を有した固体撮像素子を仮定し、この固体撮像素子に平行光が入射するときの集光シミュレーションを行っている。この図には固体撮像素子における一つの画素構成を示しており、図から分かるように、各画素毎にマイクロレンズ101およびこれにより集光された光を受光する受光部（フォトダイオード）102が設けられており、受光部102の受光面を露出させるとともにこれ以外の領域を覆う遮光膜103が設けられている。このような画素が同一平面上にマトリクス状に配設されて固体撮像素子が構成される。

【0004】 この集光シミュレーションにおいては、各画素の構造データ（例えば、画素配列ピッチ、隣同士のマイクロレンズの間隔、マイクロレンズの厚み、マイクロレンズから受光部までの距離、受光部の開口寸法、遮光膜の厚さなど）と、マイクロレンズおよびその下における受光部までの部分の光学定数（屈折率等）が与えられ、スネルの法則から、光線追跡によりマイクロレンズによる入射光線の集光の様子がシミュレーションされる。このシミュレーション結果による光線経路を、図13に実線で示しており、入射光線本数に対して受光部102に到達した光線の本数の割合を計算すれば、マイクロレンズ付き固体撮像素子の実効開口率が求まる。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、上記のシミュレーションでは平行光線のみを用いて光線追跡を行っているため、撮像素子の全面に平行光線が入射するというきわめて特殊な場合の集光率を比較的精度良く計算できるだけである。実際のビデオカメラやデジタルスチルカメラでは、カメラレンズ系で集光された光線が撮像素子に入射しており、レンズの焦点距離やF数によって入射光線の入射角等は大きく変化する。また、レンズの光軸上の画素に集光する光と、光軸から離れた位置の画素に集光する光とでは、同じ焦点距離とF数のカメラレンズ系で集光された光でも、画素への光入射の様子は異なる。このため、上記シミュレーションではこのような実際に生じる入射光線に対して正確なシミュレーションを行えないという問題がある。

【0006】 さらに、マイクロレンズの表面を解析的な曲面として厳密にモデル化することは非常に難しく、上記のようにトーリック面と仮定した場合には、マイクロレンズの平面視における中心部の曲面は実際のレンズに良好に近似するが、マイクロレンズの端部では実際のレンズの曲面形状との誤差が大きくなり、集光率の計算誤差が大きくなるという問題がある。このようなことか

ら、従来のシミュレーション方法では、カメラレンズ系の影響や、画素端部でのシェーディングをシミュレーションできず、シミュレーション精度があまり良くなかった。

【0007】本発明は、このような問題に鑑み、カメラレンズ系の曲面モデルをより現実の形状に近づけ、固体撮像素子に入射する前のカメラレンズ系の条件を考慮し、さらに、固体撮像素子の各画素部におけるシェーディングも考慮し、精度の高い集光シミュレータを提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】このような目的達成のため、本発明に係る集光シミュレータは、カメラレンズ系により集光された光を画素毎にマイクロレンズを設けた固体撮像素子に入射させるときの集光シミュレーションを行うものであるが、カメラレンズ系の光学設計値に関するデータを入力する第1入力手段と、マイクロレンズの構造に関するデータを入力する第2入力手段と、マイクロレンズの下側における固体撮像素子を構成する平坦化膜、カラーフィルタ、配線部、フォトダイオード等の構造に関するデータを入力する第3入力手段と、固体撮像素子における撮像面の画素を構成するフォトダイオードの位置を入力する第4入力手段と、マイクロレンズ、平坦化膜、カラーフィルタ、配線部、フォトダイオード等の各界面での光の入射角および屈折角、光の透過率および反射率を計算する第1計算手段と、カメラレンズ系の口径食を考慮し、入射光強度の光軸に対する入射角依存性を計算する第2計算手段と、上記第1～第4入力手段により入力されたデータと上記第1および第2計算手段の計算結果とに基づいて、各画素位置におけるフォトダイオードの受光量を計算する第3計算手段とを備えて集光シミュレータを構成する。

【0009】なお、固体撮像素子にフォトダイオードの受光面の周りを遮光する遮光膜を設け、集光シミュレータが遮光膜における光反射を計算する第4計算手段も備え、上記第3計算手段は、第4計算手段も加えてフォトダイオードの受光量の計算を行うようにするのが好ましい。

【0010】このような構成の本発明に係る集光シミュレータを用いれば、マイクロレンズの曲面モデルをより現実の形状に近づけ、固体撮像素子に入射する前のカメラレンズ系の条件（例えば、レンズ口径食、入射角度等）を考慮し、さらに、固体撮像素子の各画素部におけるシェーディングも考慮し、精度の高い集光シミュレーションを行うことができる。

【0011】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の好ましい実施形態について説明する。まず、本発明の集光シミュレータにより集光シミュレーションを行う対象となる固体撮像素子の一つの画素構造を図1(a)に模式的

に示している。この画素構造は、シリコン(Si)基板507の上に、固体撮像素子の駆動回路等が設けられた配線部506、遮光膜505、平坦化膜504、OFC（オンチップカラーフィルタ）503、無反射膜502およびマイクロレンズ501を図示のように積層形成して構成される。なお、カラーフィルタ503は通常、原色系か補色系の色付き樹脂であり、無反射膜502および平坦化膜504は無色透明な樹脂である。また、遮光膜505には矩形状の遮光開口部508が形成されており、シリコン基板507にはこの遮光開口部508に対向して受光部（フォトダイオード）509が設けられている。

【0012】マイクロレンズ501は、平面図上の中心点Oを通る垂直線において頂点Aを有し、この位置での厚み t （=距離AO）を有し、平面図におけるx方向の幅BCとy方向の幅CDとを有する。さらに、x方向のギャップは $divx$ の二倍の値であり、y方向のギャップは $divy$ の二倍の値である。遮光膜505のx方向およびy方向の開口幅をそれぞれ T_{cut} および L_{cut} で示し、受光部のx方向およびy方向の幅をそれぞれ TPD および LPD で示している。この図にはコーン状に集光された入射光束510を示しており、この光束は無反射膜502の表面の点Gに焦点を有する。本実施形態では、このような入射光束が画素上の全面に無数に入射するとしてシミュレーションが行われる。

【0013】次にマイクロレンズの形状について説明する。マイクロレンズ501を頂点Aと中心点Oを結ぶ垂直線AOを含む任意の面で切断した場合の断面形状を、図1(b)に示しており、本実施形態においてはこの断面が円弧状になると仮定した。なお、この円弧の曲率は、厚さ t （=AO）が決まっているため、底辺EFの長さが決まれば定義され、この長さは、図1(a)から分かるように、切断面の位置に応じて変化する。

【0014】本シミュレーションでは、集光率の計算において、撮像素子に入射する前の光学系（例えば、カメラのレンズ系）の依存性を考慮するために、カメラレンズ系の焦点距離 f 、F数に基づいて入射光の入射角度を計算する。さらに、特に大型撮像素子などでは、撮像素子の撮像面中心部と撮像面端部では同じカメラレンズ系でも入射角の入射角度成分が変化し、撮像面端部の方がより斜め入射成分が多くなり、シェーディングが起りやすくなる。このような現象をシミュレーションするために、カメラレンズ系の焦点距離 f 、F数および撮像面内の位置に依存する、ある角度幅を持ったコーン状に集光した入射光を考え、このコーン状の入射光が一つの画素上のあらゆる場所に無数に入射する場合における各光線の追跡を行って集光率を計算する。

【0015】まず、カメラレンズ系からの入射光が、入射する画素位置によってどのように変化すると仮定しているかを、図2により説明する。図2(a)は、焦点距離

10

20

30

40

50

f、レンズ有効径φのレンズの光軸上の焦点における集光の様子を二次元の断面図で示したものである。レンズの口径比F数は、下記の式(1)で表される。

【0016】

【数1】 $F = f / \phi$... (1)

【0017】図2(a)における光軸上の焦点での最大入射角θ_{ij}は、下記の式(2)で表される。

【0018】

【数2】

$$\theta_{ij} = \tan^{-1} \left\{ (\phi/2) / f \right\} = \tan^{-1} \left\{ 1 / (2F) \right\} \quad \dots (2)$$

【0019】焦点距離f=50mm、F=1.4のレンズ系を使用した場合の撮像面中心部での画素の入射光の最大入*

$$\theta_{i2} = \tan^{-1} \frac{\frac{\phi}{2} + l}{f} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2F} + \frac{l}{f} \right) \quad \dots (3)$$

$$\theta_{i3} = \tan^{-1} \frac{\frac{\phi}{2} - l}{f} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2F} - \frac{l}{f} \right) \quad \dots (4)$$

【0022】具体的には、例えば、APS-Cサイズの撮像素子の画素端部(中心からx方向に12.55mm、y方向に8.35mmずれた位置の画素部)では、集光位置は撮像素子上(結像面上)をカメラレンズ系の光軸に垂直な方向に15.07mm($=\{(12.55\text{mm})^2 + (8.35\text{mm})^2\}^{1/2}$)だけずれた位置となる。よって、焦点距離f=50mm、F=1.4のカメラレンズ系を使用した場合、(3)、(4)式に、F=1.4、f=50、L=15.07を代入すると、図2(b)でθ_{i2}とθ_{i3}はそれぞれ、33.37°と3.19°となり、光軸上の場合に比べて、より入射角度の大きい斜め入射成分の光線

が多くなる。
【0023】本シミュレーションでは、上記のような光線追跡を三次元空間で行い、入射光線の本数に対する受光部での受光本数の割合を計算することによって集光率を計算する。但し、実際のカメラレンズ系では、1枚の単レンズのみで構成されていることは殆どなく、複数のレンズが組み合わされて構成されている、このため、結像面側での実際のカメラレンズの光学系では焦点距離fとレンズ有効径φの代わりに、射出瞳位置f_{o,r}と射出瞳径φ_{o,r}を用いる方が有効である。この場合には、光軸上では上記式(1)、(2)にf=f_{o,r}とφ=φ_{o,r}を代入してもそのまま成り立つ。また、本シミュレーションでは、光軸からずれた位置に置いて、上記式(3)、(4)にf=f_{o,r}とφ=φ_{o,r}を代入してそのまま成り立つと仮定している。さらに、光軸からのずれ量に基づいてf_{o,r}とφ_{o,r}の変化量を計算することにより精度の高いシミュレーションが可能となる。このため、以後の計算においても、実際に用いられるカメラレンズ系を想定したシミュレーションの場合には、f=f_{o,r}とφ=φ_{o,r}を代入して計算する。

* 射角は、上記(2)式より、θ_{ij}=19.65°であり、画素への入射光は図2(a)の光軸を中心に、上下とも0°~19.65°までの入射角の光が入射する。

【0020】図2(b)では、同じカメラレンズ系の像面上で、光軸から距離lだけずれた位置(図における点O₂の位置)での集光の様子を示している。このように光軸からずれた位置で、カメラレンズ系による口径食(ケラレ、またはvignetting)が無いと仮定すると、O₂点での入射角は図2(b)のθ_{i2}~θ_{i3}の範囲であることが分かる、これらθ_{i2}およびθ_{i3}は、図2(b)より下記(3)および(4)式で表される。

【0021】

【数3】

【0024】さらに、カメラレンズ系からくるある角度幅を持った入射光束は、そのカメラレンズ系特有の光線密度を持っており(一般に、レンズ系の中心を通る光線の方が、端部を通る光線より光線密度が高い)、その光線密度に比例して入射角度幅内に光線を配分する(図2(c)参照)。当然ながら、配分する光線の本数を増やして、光線追跡を密に行えば計算の精度は上がるが、計算時間と計算精度のバランスを考慮して、光線の本数を設定する。

【0025】本実施例では、上記シミュレーションを三次元に拡張する。カメラレンズ系からの光が撮像素子の各画素にどのように集光すると仮定しているかについて、図3を用いて説明する。空間を、xyzの座標軸で表現するとして、原点を中心としたxy平面内の円Oをカメラレンズ系の有効径内領域とする。なお、レンズデータとして、ケラレを考慮するために、撮像素子上の各画素の位置(光軸からのずれ量)によって、射出瞳径の変化を考慮し、図3の円Oの形(射出瞳)を変化させることにより、さらに精度の高いシミュレーションが可能である。

【0026】図において、長さfはカメラレンズ系の焦点距離を示し、四角形ABCDは撮像面を示し、点aは画素中心部を示し、点bは撮像素子上の任意の画素部を示し、番号701はカメラレンズ系からの入射光線束を示す。本シミュレーションでは円Oを底面として、点bを頂点としたコーン状の光束701が点bの画素に集光すると仮定している。このコーン状の光束701は画素中心部a以外では傾いた円錐形であり、点bが四角形ABCDの端部になるほどその傾きはきつくなり、画素端部での斜め入射光束を良く再現している。

【0027】二次元集光シミュレーションの場合、図2(c)と同様に、図3のカメラレンズ系からくるある角度幅を持ったコーン状の光束も、そのカメラレンズ系特有の光線密度を持っており（一般に、レンズ系の中心を通る光線の方が、端部を通る光線より光線密度が高い、すなわち、図3の円Oの中心近傍で光線密度が高い）、その光線密度に比例して入射角度幅内、すなわち、図3の円O内に光線を配分する。当然、配分する光線の本数を増やして密に光線追跡を行えば計算の精度は上がるが、計算時間と計算精度のバランスを考慮して、光線の本数を決定する。

【0028】次に、各画素での集光シミュレーション方法について、まず、図4(a)～(d)の二次元断面図を用いて説明する。図4(a)は図2(a)のカメラレンズ系からの入射光束の集光点O₁近傍の1画素を拡大して示す。図4(a)において、Wpitchは1画素分のピッチであり、W_{po}は受光部の開口幅であり、309は画素表面から受光部310までの構造を示し、この構造部分は、無反射膜層、OCF層、平坦化膜層、遮光Al膜層、配線部層などの積層構造からなる。点O₁は各集光光束301～304の集光点305～308を示しており、図2(a)の点O₁に対応している。

【0029】撮像素子に焦点が合っている場合、前述のようにある角度幅を持った入射光束が画素に入射する際に、撮像素子の最表面には図2(a)で示される形状の集光光束301～304が1画素上に無数に入射する。なお、図4(a)の場合は、マイクロレンズがない場合であり、各入射光束301～304の焦点はそれぞれ撮像素子の最表面に合っている。このとき、ある角度幅を持った入射光束301～304を1画素上に等間隔に設定する。このとき、当然ながら、入射光束の設定間隔を密にすれば計算精度はあがるが、計算時間と計算精度のバランスを考慮してその間隔を設定する。

【0030】また、厳密には、1画素上の集光点305～308に収束する光束301～304はそれぞれ、光軸からの距離に応じて微妙に集光状態が変化する。当然、光束301～304を、光軸からの距離を正確に勘案して計算しても良い。本実施例では、同一画素上では各集光光束301～304は同一の形状であると近似してシミュレーションを行っている。図4(a)の場合は1画素の集光点を4点に分割し、入射光束も四つ描いたケースである。図4(a)の場合、二次元平面での集光を考慮しており、マイクロレンズが存在しないため、入射光線の総本数に対する受光部内に到達する光線の本数は、1画素の幅（すなわち、画素ピッチ）に対する受光部の開口幅の割合（ $=W_{po}/Wpitch$ ）と一致する。

【0031】次に、図4(b)を用いて、撮像素子中心部の画素において、マイクロレンズ311が設けられている場合の集光率の計算について説明する。ここでは、カメラレンズ系からの入射光線束は図4(a)の場合と同様

に撮像素子の最表面に焦点が合うように入射すると仮定する。すると、各光線束は撮像素子の最表面上に形成されたマイクロレンズにより、図4(b)に示すように集光し、このときの入射光線の総本数に対する受光部内に到達する光線の本数が、マイクロレンズ付きの撮像素子の集光率に対応する。

【0032】さらに、図4(c)、(d)を用いて、撮像面端部の画素で、マイクロレンズがある場合の集光率の計算について説明する。図4(c)は図2(b)のカメラレンズ系からの光束の集光点O₂近傍の1画素を拡大した図であり、撮像面端部の画素でのマイクロレンズがない場合の集光の様子を示す。図2(b)のO₂点に集光する光束301はある角度幅を有している。集光光束302～304も光束301と同様の形状の集光光束であり、それぞれ集光点306～308を有する。撮像素子に焦点が合っている場合、撮像面端部の画素では、前述のようにある角度幅を持った入射光束が画素に入射する際に、撮像素子の最表面には図2(b)で示される形状の集光光束301が1画素に無数に入射する。なお、図4(c)の場合はマイクロレンズがないケースであり、4個の集光光束301～304が示されており、各入射光束の焦点はそれぞれ撮像素子の最表面にあっている。

【0033】このとき、ある角度幅を持った入射光束301～304を1画素上に等間隔に設定するが、当然その間隔を密にすれば計算精度は上がるが、計算時間と計算精度のバランスを考慮してその間隔を設定する。また、厳密には1画素上の集光点305～308に収束する光束301～304はそれぞれ、光軸からの距離に応じて微妙に変化する。当然、光束301～304を光軸からの距離を正確に勘案してそれぞれ計算しても良い。本実施例では、同一画素上では各集光光束301～304は同一の形状であると近似してシミュレーションを行っている。なお、図4(c)の場合は1画素の集光点を4点に分割し、入射光束も四つ描いたケースである。

【0034】図4(c)の場合、二次元平面での集光を考慮しており、マイクロレンズが存在しないため、入射光線の総本数に対する受光部内に到達する光線の本数は、1画素の幅（すなわち、画素ピッチ）に対する受光部の開口幅の割合（ $=W_{po}/Wpitch$ ）と一致する。

【0035】次に、図4(d)は図2(b)のカメラレンズ系からの光束の集光点O₂近傍の1画素を拡大した図であり、さらに画素部にマイクロレンズがある場合を示す。このとき、カメラレンズ系からの入射光線束は撮像面端部の画素であることから、図2(b)のように、ある斜め入射成分を中心に幅を持った入射角の光線束になる。そして、このような光線束が図4(b)と同様に、撮像素子の最表面に焦点が合うように入射すると仮定する。すると各光線束は撮像素子の最表面に形成されたマイクロレンズにより、図4(d)に示すように集光し、このときの入射光線の総本数に対する受光部内に到達する

光線の本数が、マイクロレンズ付きの撮像素子の集光率となる。

【0036】本実施例では上記シミュレーションを三次元に拡張する。各画素部での入射光線束が入射する様子を図5に示す。この図では、図1(a)と同様に、カメラレンズ系からコーン状に集光してきた入射光線束810～890を示しており、各入射光線束810～890は焦点P₁～P₉を有する。この図は一つの画素を示しており、最表面部801の上に波線で示すマイクロレンズ802を有する。上記焦点P₁～P₉は最表面部801の上にあり、面上に均等に分配されている。各入射光線束810～890は、図3で定義された光線束701に該当し、カメラレンズ系の焦点距離fとF数と撮像面上の画素位置によって決定される。図5では、入射光線束の焦点は9点である。一画素面上でこの点の数を増やして入射光線束の数を増やせば、より密に光線追跡ができて計算精度は上がるが、計算時間と計算精度のバランスを考慮して光線束の本数を設定する。そして、各光線束内に*

$$T_p = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \quad \dots (6)$$

$$T_s = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad \dots (7)$$

$$T = \frac{T_p + T_s}{2} \quad \dots (8)$$

$$R = 1 - T \quad \dots (9)$$

【0041】式(6)において、T_pは界面でのP偏光の透過率である。式(7)において、T_sは界面でのS偏光の透過率である。また、入射光は自然光であり、電場の振動方向がランダムに変化する光であると仮定し、その場合の自然光の透過率は、P偏光とS偏光の二つの成分の強度の和と考えて計算した。よって、式(8)において、Tは自然光の界面での透過率である。また、式(9)において、Rは界面での吸収がないと仮定した場合の自然光の界面での反射率である。必要があれば、参照データとして各界面での反射率の計算も、式(9)により可能である。

【0042】さらに、カメラレンズ系への斜め入射成分については、cos⁴θ法則を用いた。これはカメラレンズ系の光軸上の入射光束の像点での明るさを1とすると、反射や吸収を考慮しなければ、入射光束と光軸の傾きがθの光束の像点での明るさはcos⁴θとなるという法則である。

【0043】その他、カメラレンズ系特有のケラレのデータを入力することにより、より高精度なシミュレーションが行える。

【0044】以上のように、撮像素子の各画素に入射する光はその前のカメラレンズ系の光学的構造(焦点距離fとF数)と、画素の撮像素子上の位置によって入射の

* 図7の光線束と同様の光線密度を定義する。

【0037】次に、上記のように定義された各光線が、マイクロレンズおよびその下の無反射膜、OCF、平坦化膜、遮光Al層、配線層などを通して受光部に至るときの光線追跡の計算を行う。なお、この光線追跡の計算に際して、各材料の界面の屈折の計算を、式(5)に示すスネルの法則を用いて行った。

【0038】

【数4】 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \dots (5)$

【0039】式(5)において、n₁は入射側の屈折率、θ₁はその入射角、n₂は屈折して透過した側の屈折率、θ₂はその屈折角である。また、界面での屈折率差に起因する反射率、透過率の計算では、下記式(6)～(9)に示すフレネルの反射、透過係数を用いて、S偏光とP偏光それぞれについて入射角度依存性を考慮した。

【0040】

【数5】 $\dots (6)$

$\dots (7)$

$\dots (8)$

$\dots (9)$

様子が変化する。撮像素子の撮像面端部でのシェーディングを考慮した光学設計を行うためには、これらのことを考慮する必要がある。本発明の集光シミュレータでは、以上のことを全て考慮して、撮像素子の撮像面端部でのシェーディングや集光率のカメラレンズF数依存性を三次元で精度良くシミュレーションすることができ

る。

【0045】図6は、本発明の三次元集光シミュレータの概略構成を示すブロック図である。このシミュレータは、マイクロレンズ付き撮像素子の一画素の幾何学的、光学的構造パラメータと、カメラレンズ系により決定される撮像素子への集光光線の入射条件と、入射光線本数や、一画素上の入射点数などの計算条件を入力する装置(キーボードなど)601と、光線追跡計算および集光率計算を行うCPU602と、計算結果を出力する出力装置(CRTやプリンタなど)603を有する。

【0046】図7A～図7Cは、本発明の三次元集光シミュレータの演算装置内で実行されるシミュレーションの演算フローチャートを示し、図7Aから図7Bに繋がり、さらに、図7Bから図7Cに繋がる。以下、図7A～7Cのフローチャートを用いて実際のシミュレーションの手順の説明を行う。

【0047】このシミュレーションにおいては、キーボ

ードから、撮像素子の画素ピッチPと、マイクロレンズの厚み d_{mic} および屈折率 n_{mic} と、マイクロレンズのx方向の分離幅 $divI$ およびy方向の分離幅 $divL$ といったような、マイクロレンズの幾何学的および光学的構造を入力する(ステップS1)と、これら入力データに基づいてマイクロレンズの曲面が決定される(ステップS2)。

【0048】次に、無反射膜の厚み d_{ar} および屈折率 n_{ar} と、OCFの厚み d_{ocf} および屈折率 n_{ocf} と、平坦化膜 d_{flat} および屈折率 n_{flat} と、遮光膜の厚み d_{cut} と、開口部のx方向およびy方向のサイズ T_{cut} , L_{cut} と、配線層の厚み d_{wire} および屈折率 n_{wire} と、受光部のx方向およびy方向のサイズ T_{PD} , L_{PD} とを入力する(ステップS3)と、これら入力データに基づいて、撮像素子の幾何学的、光学的構造が決定される(ステップS4)。

【0049】次に、カメラレンズ系の焦点距離 f とF数、および撮像素子上のどの位置の画素位置を指定するかという条件、具体的には、中心画素からx方向へのずれ量 T_{pix} とy方向へのずれ量 L_{pix} とを入力する(ステップS5)と、これら入力データに基づいて、カメラレンズ系から撮像素子への光の入射条件が決まる(ステップS6)。

【0050】次に、一画素への入射光線の本数の入力を行う。ここではまず、入射光線束の数(例えば、図5の場合には点P1~P9までの9点)をx方向の分割数 N_T とy方向の分割数 N_L (図5の場合には N_T , N_L とも3点)を用いて入力する。さらに、一つの入射光線束に対する光線本数の設定を行うが、この設定の仕方を図8を用いて説明する。コーン状の図形は図3と同様の入射光線束を表し、点Oを中心とした円はカメラレンズ系の有効径を表す。撮像素子の任意の画素部bに、カメラレンズの有効径内がコーン状に入射してきた光線束の焦点が位置する。そして、カメラレンズの有効径内の円を、中心Oを通る n 個の方向 $d_1 \sim d_n$ に分割する。例えば、図8では、 $d_1 \sim d_4$ の4方向に分割している。さらに、各方向を m 個の点に分割する(図9では6個)。これにより、一入射光線束の光線本数は $(n \times m)$ 本となる。また、一画素に入射する総光線本数は、 $(n \times m \times N_T \times N_L)$ 本となり、このデータ入力を行えば(ステップS7)、追跡する光線の総本数と、その入射方向および位置が決定する。

【0051】以上により、計算条件の設定が終了し、計*

$$N_{p0} = N_{p0} + (T_{mic} \times T_{ar} \times T_{ocf} \times T_{flat} \times T_{wire})$$

... (10)

【0056】上記ステップS17aもしくは17bにおける N_{p0} の計算がなされると、全光線について追跡計算したか否かを判断し(ステップS18)、まだ、光線追跡計算をしていない入射光線があれば、その入射光線についてステップS9に戻って上記と同様の計算を行う。

*算がスタートする(ステップS8)。そして、入射光が直接マイクロレンズへ入射するか否かを判断し(ステップS9)、マイクロレンズへ入射するならば、入射光とマイクロレンズの交点を計算して、空気とマイクロレンズの界面での入射角、屈折角と光の透過率 T_{mic} を求め(ステップS10)、さらに、屈折後のマイクロレンズ内での入射光線追跡を行い、入射光のマイクロレンズと無反射膜界面での交点を計算して、その界面での入射角、屈折角と光の透過率 T_{ar} を求める(ステップS11a)。また、入射光がマイクロレンズへは入射せずに直接無反射膜へ入射する場合は、入射光と無反射膜の交点を計算して、空気と無反射膜の界面での入射角、屈折角と光の透過率 T_{ar} を求める(ステップS11b)。

【0052】次に、ステップS11aおよび11bでの計算結果に基づいて、これらの光の屈折後の無反射膜内での入射光線追跡を行い、入射光の無反射膜とOCF界面での交点を計算して、その界面での入射角、屈折角と光の透過率 T_{ocf} を求める(ステップS12)。そして、屈折後のOCF内での入射光線追跡を行い、入射光のOCFと平坦化膜界面での交点を計算して、その界面での入射角、屈折角と光の透過率 T_{flat} を求める(ステップS13)。

【0053】次に、屈折後の平坦化膜内での入射光線追跡を行い、入射光の平坦化膜と遮光A1膜との界面での交点を計算して、遮光A1膜の開口部へ光が入射しているかどうかを判断する(ステップS14)。開口部へ入射している場合は、開口部は主に撮像素子の配線層であるため、既にステップS14で計算された平坦化膜と遮光A1膜開口部(すなわち、配線層)との交点をを用いて、その界面での入射角、屈折角と光の透過率 T_{wire} を求める(ステップS15)。一方、開口部へ入射していない場合には、その光線は受光部には達しないと判断して、受光光線本数 N_{p0} には、それまでの受光光線本数 N_{p0} を代入する(ステップS17b)。

【0054】遮光A1膜開口部を通過してきた入射光については、屈折後の配線層内での入射光線追跡を行い、入射光の配線層と受光部面との界面での交点を計算して受光部内へ光が入射しているか否かを判断する(ステップS16)。受光部へ入射している場合は、式(10)により N_{p0} を求める(ステップS17a)。

【0055】

【数6】

また、全入射光線について計算が終了したら、式(11)より集光率を求める(ステップS19)。

【0057】

【数7】

$$\text{集光率} = N_{PD} / (N_T \times N_L \times n \times m) \quad \dots (11)$$

【0058】最後に集光率をCRTやプリンター等に出
力する(ステップS20)。また、受光部での光線の集
光する様子や、任意の断面での集光の様子を、途中の光
線追跡中の座標をプロットする事により二次元で描画し
て、CRTやプリンター等に出力する(ステップS2
0)。

【0059】なお、この実施例では撮像素子のマイク
ロレンズの集光シミュレーションについて説明したが、本
シミュレーションは撮像素子に限定されるものではなく、
LCDやプロジェクターなどのシミュレーションにも
10 応用可能である。

【0060】次に、実際のシミュレーション結果を図9
および図10に示す。これらの図10は全て同じ画素構
造を示し、マイクロレンズ1001、無反射膜100
2、OCF1003、平坦化膜1004、遮光Al膜10
05、配線層1006および受光部1007をSi基板
1008の上に有して画素が構成される。

【0061】図9(a)は、焦点距離50mm、F数11
のカメラレンズを用いた場合の、中心部の画素での集光
の様子を、光軸と平行な断面図で見たものである。図9
(b)は、焦点距離50mm、F数1.4のカメラレンズを
用いた場合の、中心部の画素での集光の様子を、光軸と
平行な断面図で見たものである。図10(a)は、焦点距
20 離50mm、F数11のカメラレンズを用いた場合の、
撮像面の端部の画素での集光の様子を、光軸と平行な断
面図で見たものである。図10(b)は、焦点距離50m
m、F数1.4のカメラレンズを用いた場合の、撮像面の
端部の画素での集光の様子を、光軸と平行な断面図で
見たものである。

【0062】これらの図からも分かるように、同じ素子
でもカメラレンズのF数によって集光の様子が異なっ
ており、F数が小さくなるほど受光部での集光が甘くな
り、遮光Al膜によって蹴られる光が多くなる。また、撮
像面の端部の画素では斜め入射光が遮光Al膜により蹴ら
れてシェーディングが起きている様子がわかる。

【0063】さらに、図9および図10の遮光Al膜10
05の端面での光の反射を考慮すると集光率は上がって
くる。つまり、入射光線が遮光Al膜の端面で反射して、
その反射光が受光部1007に入射する場合には、その
光線は受光された光線としてカウントするのである。実
40 際に本集光シミュレータで上記のように遮光Al膜の端
面での反射を考慮したシミュレーションを行うと、反射を
考慮しない場合に比べて、カメラレンズ系のF数にも依
存して、数パーセントから十数パーセントの集光率の向
上が確認できる。また、実際のCCD等の素子では、遮
光膜が受光面まで落とし込んで形成されている場合が多
く、その遮光面での反射を考慮する方が、より現実に忠
実なシミュレーションとなると考えられる。本集光シミ
ュレータでも、遮光膜での反射を計算することにより、
より高精度なシミュレーションを可能としている。

【0064】図11は、同じ画素構造で、焦点距離10
0mm、F数11のカメラレンズを用いた場合の、撮像
面の端部の画素での集光の様子を、光軸と平行な断面で
見たものである。図10(a)と比べて、焦点距離が長い
分だけ斜め入射光の傾きが小さく、シェーディングも起
こりにくくなっている様子が分かる。

【0065】図12は、図9および図10と同様の条件
で、撮像面中心部の画素と撮像面端部の画素の集光率の
F数依存性を計算した結果である。この計算では、光軸
からずれた位置でのカメラレンズ系によるケラレも考慮
した光強度分布を持った入射光線束を用いている。①の
曲線は、撮像面中心部の画素での集光率のF数依存性を
示す。②の曲線は、撮像面端部の画素での集光率のF数
依存性を示し、カメラレンズ系に依存する口径食や、 $\cos^4\theta$ 法則も考慮したシミュレーション結果である。③の
曲線は、撮像面端部の画素で、画素の受光部に対してマ
イクロレンズを少し撮像面中心部よりずらした場合の集
光率のF数依存性を示す。この図から分かるように、シ
ェーディングにより、中心部に比べて端部において集光
20 率が落ちており、中心部および端部とも、F数が小さ
くなるに従って集光率が落ちている。また、マイクロレ
ンズを最適な位置にずらすことにより、撮像面端部の画
素の集光率が上がっている。

【0066】さらに、多種多様なカメラレンズ系の光軸
上および光軸から外れた任意の位置での(撮影距離など
の撮影条件の依存性やケラレなども考慮した)光強度シ
ミュレータにより、撮像面の任意の位置での集光光束を
計算して、その集光光束を用いて本三次元集光シミュ
レータにより、マイクロレンズによる撮像素子内での集光
30 の様子を光線追跡することができる。さらに、受光部で
あるフォトダイオード内での光電変換効率および信号読
み出し線への転送効率を、デバイスシミュレータにより
計算することにより、固体撮像素子による撮像状態を高
精度に且つ総合的にシミュレーションすることが可能と
なる。

【0067】

【発明の効果】以上説明したように、本発明に係る集光
シミュレータを用いれば、マイクロレンズの曲面モデル
をより現実の形状に近づけ、固体撮像素子に入射する前
40 のカメラレンズ系の条件(例えば、レンズ口径食、入射
角度等)を考慮し、さらに、固体撮像素子の各画素部
におけるシェーディングも考慮し、精度の高い集光シミ
ュレーションを行うことができる。

【0068】より具体的には、撮像素子に入射する前の
カメラレンズ系からの入射光線の条件を、レンズの焦点
距離とF数で規定し、さらに、撮像素子の各画素位置の
光軸からのずれを考慮して、マイクロレンズの三次元的
形状とその下部構造の幾何学的および光学的な構造を
規定して光線追跡することにより、画素端部でのシェ
50 ーディングや、集光率のカメラレンズ系のF数依存性など

のシミュレーションが可能となり、より実用的で高精度なマイクロレンズの三次元集光シミュレーションを行うことが可能となる。そして、この三次元集光シミュレータにより、集光率向上のための最適構造や、画素端部でのシェーディング抑制のための最適構造の設計を高精度に行うことが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】固体撮像素子の画素構造を示す模式図およびこの素子を構成するマイクロレンズの断面図である。

【図2】カメラレンズ系による集光例を示す二次元断面図である。

【図3】カメラレンズ系から撮像素子への集光光束モデルを示す説明図である。

【図4(a)】マイクロレンズがない固体撮像素子における中心部の画素での集光シミュレーションモデルの二次元断面図である。

【図4(b)】マイクロレンズを有する固体撮像素子における中心部の画素での集光シミュレーションモデルの二次元断面図である。

【図4(c)】マイクロレンズがない固体撮像素子における撮像素面端部の画素での集光シミュレーションモデルの二次元断面図である。

【図4(d)】マイクロレンズを有する固体撮像素子における撮像素面端部の画素での集光シミュレーションモデルの二次元断面図である。

【図5】本発明に係る実施例における三次元集光シミュレータモデルの画素への集光の様子を示す模式図である。

【図6】本発明に係る実施例における三次元シミュレータの概略構成を示すブロック図である。

【図7A】本発明に係る三次元シミュレータにおける演算内容を示すフローチャートである。

【図7B】本発明に係る三次元シミュレータにおける演算内容を示すフローチャートである。

【図7C】本発明に係る三次元シミュレータにおける演算内容を示すフローチャートである。

【図11】焦点距離100mm、F11のカメラレンズを用いた場合での、本発明の三次元シミュレータによる端部の画素での計算結果を示す断面説明図である。

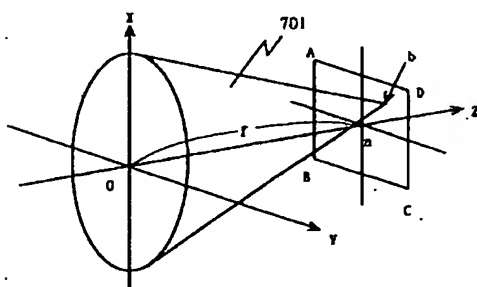
【図12】本発明に係る三次元シミュレータによる、中心部と端部のそれぞれの画素での集光率のF数依存性と、画素の端部でマイクロレンズをずらした場合の集光率のF数依存性を示すグラフである。

【図13】従来のマイクロレンズ集光シミュレーションモデルによる計算例を示す説明図である。

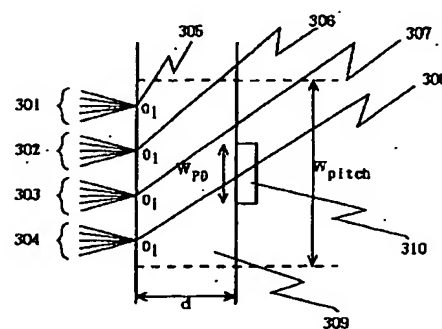
【符号の説明】

- 100 ドーム型マイクロレンズ
- 102, 310 受光部
- 301~304 カメラレンズからの入射光束
- 305~308 カメラレンズからの入射光束の集光点
- 311, 501, 802 マイクロレンズ
- 502, 1002 無反射膜
- 503, 1003 オンチップカラーフィルタ(OCF)
- 504, 1004 平坦化膜
- 505, 1005 遮光膜
- 506, 1006 配線層
- 507, 1008 Si基板
- 509, 1007 受光部
- 601 三次元シミュレータ入力装置
- 602 三次元シミュレータCPU
- 603 三次元シミュレータ出力装置

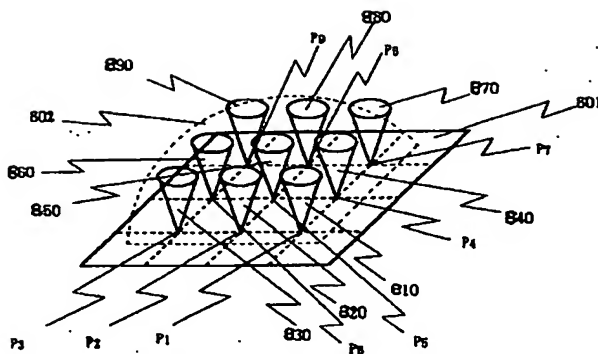
【図3】



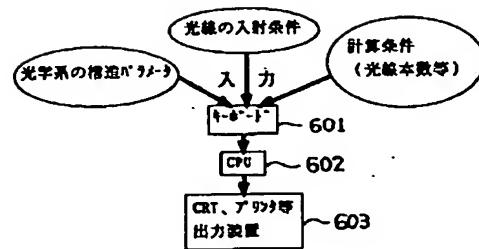
【図4(a)】



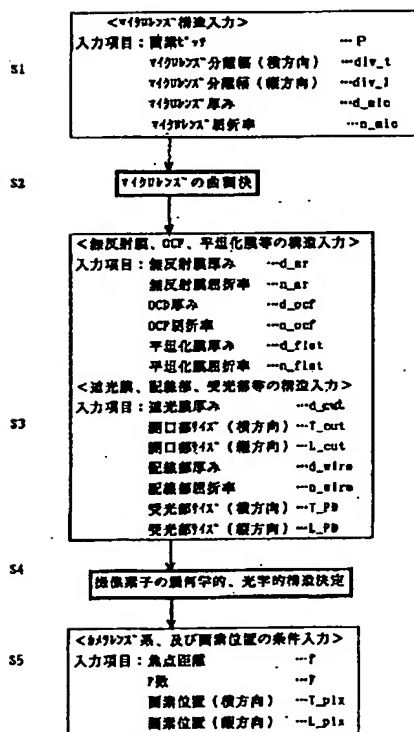
【図5】



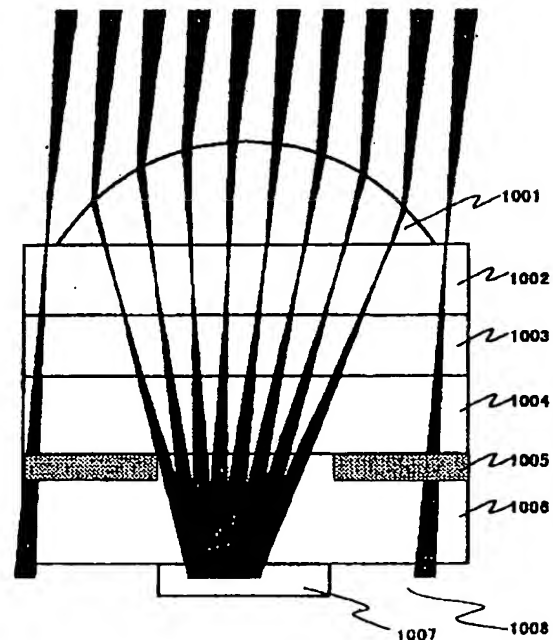
【図6】



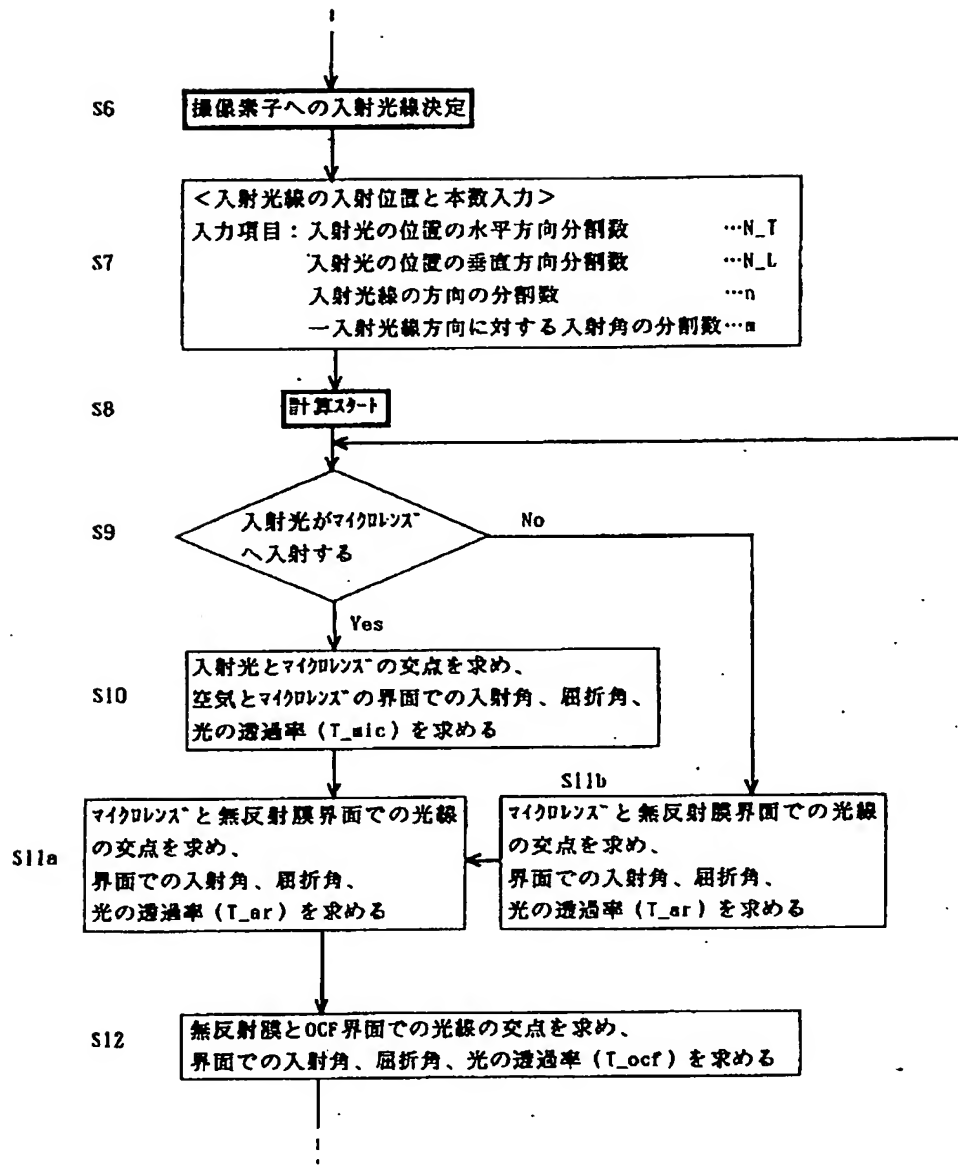
【図7A】



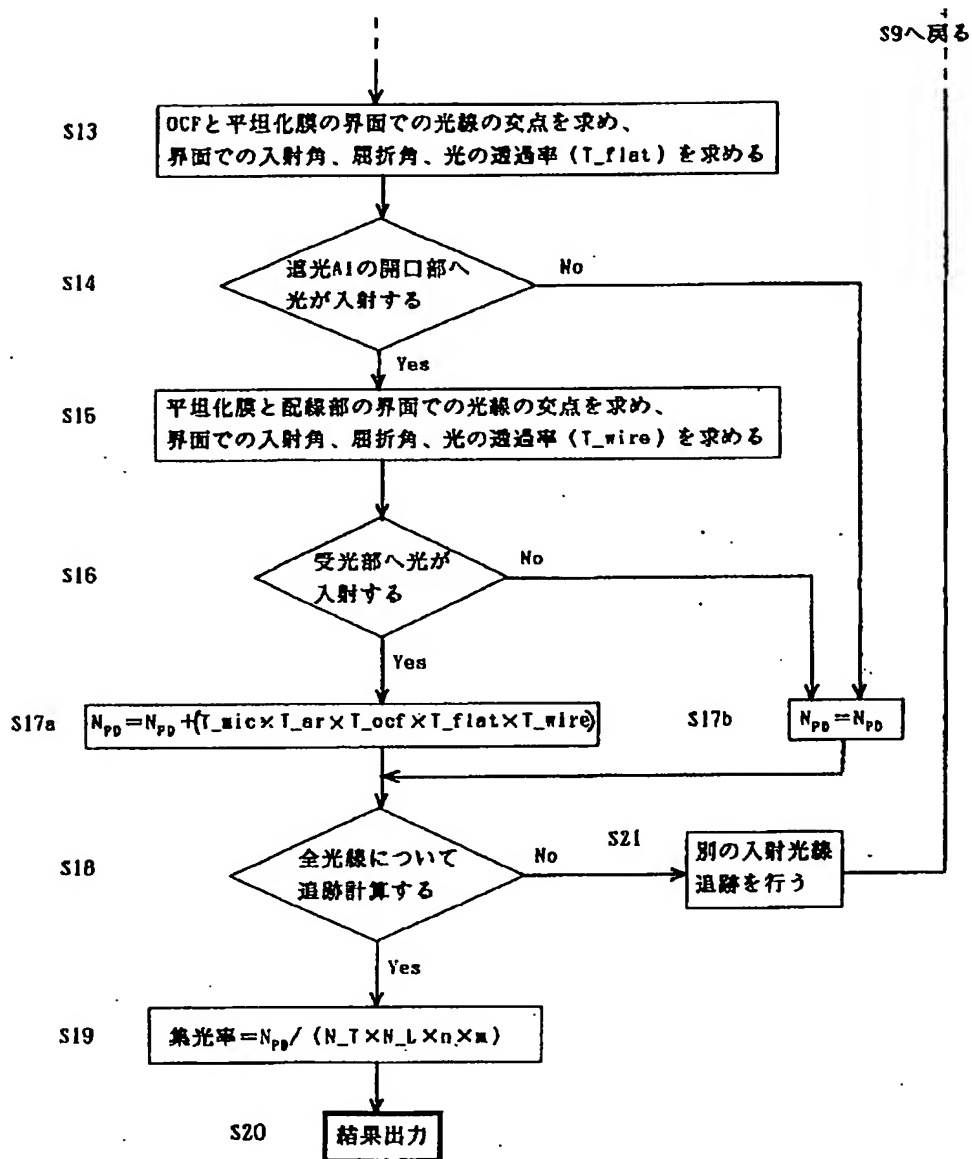
【図11】



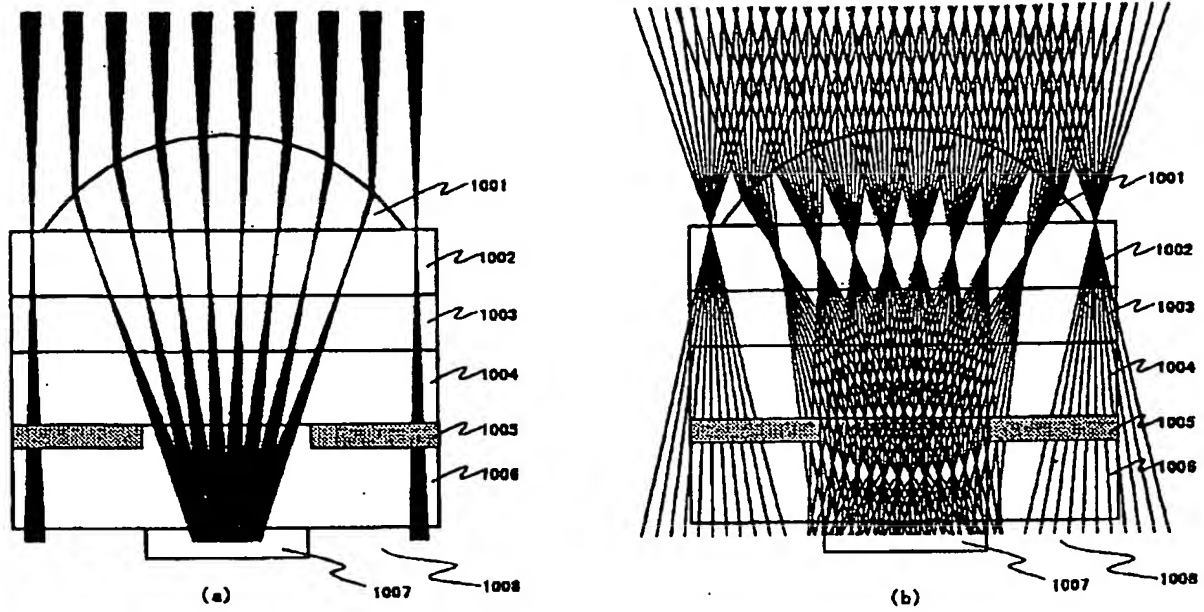
【図7B】



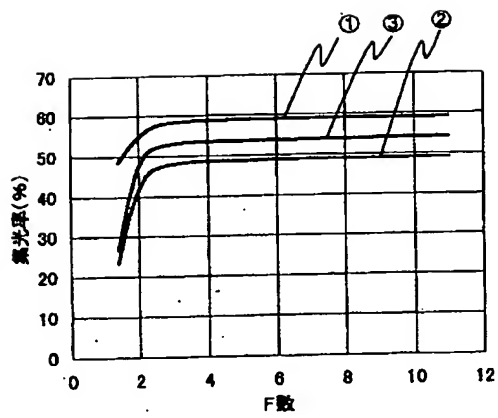
【図7C】



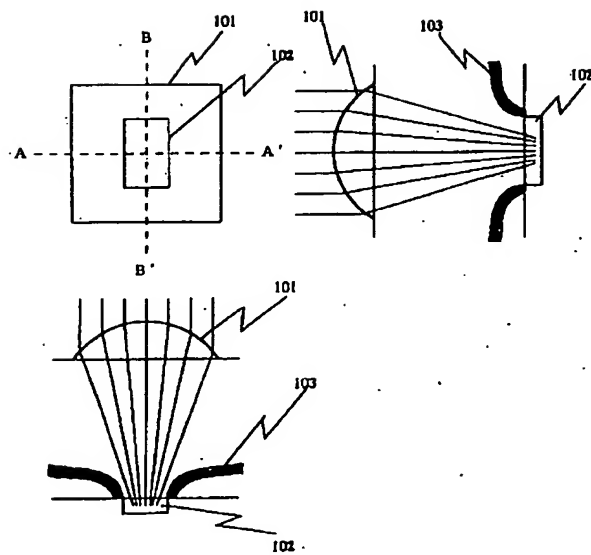
【図9】



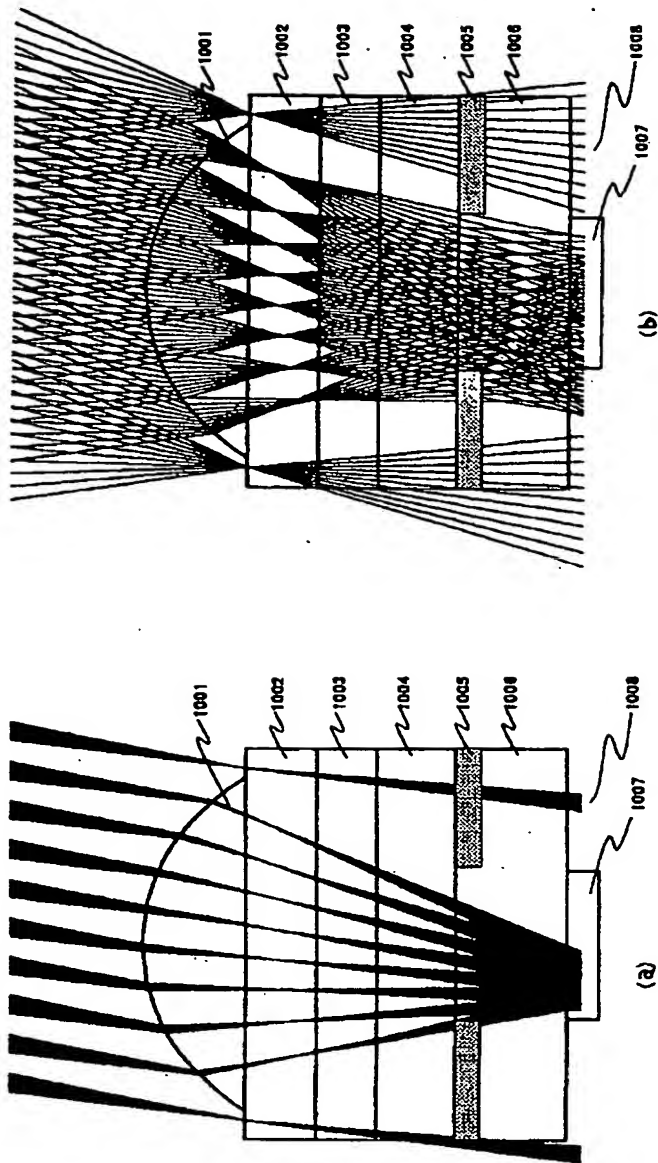
【図12】



【図13】



【図10】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ BLACK BORDERS

☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES

☒ FADED TEXT OR DRAWING

☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING

☐ SKEWED/SLANTED IMAGES

☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS

☐ GRAY SCALE DOCUMENTS

☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT

☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY

☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.